doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.06.010

# Cassini图像中受散射光影响的7颗土星近环内卫星的天体测量*

王志强[1] 刘梦琪[1] 张庆丰[1,2†] 吴林朋[1] 欧钊杰[1] 李 燕[1,2] 李 展[1,2]

(1 暨南大学信息科学技术学院计算机科学系 广州 510632)
(2 暨南大学天体测量、动力学和空间科学中法联合实验室 广州 510632)

**摘要** 卡西尼号探测器携带了光学成像科学子系统(ISS: Imaging Science Subsystem), 在2004–2017年间拍摄了一些土星内卫星的图像. 部分图像中土星内卫星非常靠近土星环, 观测对象受土星环散射光影响导致测量精度差, 甚至无法测量. 由此提出一种适用于这类图像的背景消除算法, 可对受土星光环散射光影响的土星内卫星进行测量. 归算了7颗近环内卫星(土卫十(Janus)、土卫十一(Epimetheus)、土卫十五(Atlas)、土卫十六(Prometheus)、土卫十七(Pandora)、土卫三十二(Methone)和土卫四十九(Anthe))的70张ISS图像, 并与不消除散射光的方法进行了比较. 结果显示, 该方法至少可以提高43%的精度. 和喷气推进实验室的土星卫星历表SAT415相比, 测量得到的赤经和赤纬方向的残差均值分别为0.72 km和2.26 km, 标准差分别为10.99 km和11.36 km.

**关键词** **天体测量学, 技术: 图像处理, 方法: 数据分析, 行星和卫星: 个别: 土卫十、土卫十一、土卫十五、土卫十六、土卫十七、土卫三十二、土卫四十九**

**中图分类号**: P123; **文献标识码**: A

## 1 引言

自2004年抵近土星到2017年坠毁, Cassini空间探测器的光学成像系统(ISS: Imaging Science Subsystem)拍摄了大量的土星及其卫星的图像, 这些图像在研究中被广泛使用. 2008年Cooper等[1]利用ISS图像发现了新的土星卫星—土卫四十九(Anthe)并对其进行了动力学研究, 而后又进行了一些主要土星卫星的联合天象图像的归算[2]. Tajeddine等[3–4]使用ISS图像对土星的7颗主要卫星进行了归算. 张庆丰等[5]和Zhang等[6–8]对土卫二(Enceladus)、土卫十二(Helen)、土卫四十九、土卫九(Phoebe)等土星卫星的ISS图像进行了归算, 并进行了一些ISS图像归算技术方面的研究. 2020年Lainey等[9]结合ISS图像的天体测量数据发现土卫六(Titan)向外迁移的速度比以前认为的要快上百倍. 上述研究都表明对ISS图像进行高精度天体测量有着重要的科研价值.

土星卫星中有一些小的近环内卫星, 它们尺寸

2022-11-15收到原稿, 2023-02-06收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U2031104、62071201), 国家重点研发计划项目(SQ2022YFE010342)和广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515011340)资助

† tqfz@jnu.edu.cn

小、距离土星环近甚至在环缝中, 从地面上观测它们相当困难, 一般需要使用地面大型望远镜或者空间望远镜. 2001年Poulet等[10]发表了4颗内卫星(土卫十(Janus)、土卫十一(Epimetheus)、土卫十六(Prometheus)和土卫十七(Pandora))的145个天体测量位置, 图像来自于欧南台3.6 m望远镜1995年8月的观测以及哈勃空间望远镜在1995年11月的观测, 并利用这145个天体测量位置数据对卫星的轨道参数进行了计算. 2005年Porco等[11]根据Cassini ISS图像发现了新的土星小内卫星土卫三十二(Methone)、土卫三十三(Pallene)和土卫三十四(Polydeuces)等, 同时对新卫星和已知卫星轨道进行了研究. 2006年Spitale等[12]利用多方面数据确定了土卫十、土卫十一、土卫十七等10颗土星内卫星的轨道数据, 他们在测量Cassini的图像中, 使用了高斯拟合法确定星体的中心, 对于难以测量的星体, 直接用肉眼挑选最大灰度值所在的像素作为中心位置. 根据2021年Zhang等[7]的研究可以知道, 高斯法对于ISS图像效果欠佳, 且直接肉眼挑选的方法测量精度更差. 另外文献[7]也发布了一批土卫四十九的测量位置. 事实上早在2008年, Cooper等人在文献[1]中也已经发布了一些土卫四十九的天测位置. 文献[7]则丰富了其数据, 改善了测量精度. 2008年Jacobson等[13]在文献[12]的基础上利用后续的ISS图像对土星内卫星的轨道数据进行了更新. 2014年Cooper等[14]使用2004—2013年期间的几个土星内卫星的Cassini观测图像, 进一步更新了轨道及质量的测量结果. 2018年Cooper等[15]发布了Cassini ISS图像专用天体测量软件Caviar, 也发布了几个近环内卫星的一些天体测量位置. 2019年Lainey等[16]对ISS图像进行了测量, 使用测量结果更新了多个土星内卫星的平均密度等物理参数. 上述研究表明在土星的近环内卫星的天体测量方面, Cassini的图像提供了重要资料并占据重要地位. 这些ISS图像的测量并没有明确指出是否使用了受到散射光影响的土星内卫星的图像. 但ISS图像的天体测量标准软件Caviar在处理受散射光影响的图像时存在一些问题, 一部分无法进行测量, 一部分即便可以测量也精度较低. 这主要是因为它没有对散射光背景进行处理. 这些图像的高精度测量一方面可以为土星系统的动力学研究提供更多的数据, 另一方面高精度数据对潮汐效应、震动模型等的细致研究也非常有益[9].

对于复杂背景的处理, 2007年Shen等[17]研究CCD恒星图像的多目标轨迹获取方法时, 提出了一种基于背景消除的目标检测方法, 该算法的背景消除方法是将低于阈值的像素灰度值设为零, 通过连续图像的叠加和形态学膨胀运算生成一帧掩模图像, 用掩模图像遮挡恒星以达到消除背景的效果. 此方法需要多张连续的、背景相对简单的且拥有固定恒星和运动目标作参考的图像, 这里的ISS图像并不具备这些特征, 无法使用该方法. 2018年谢华娇等[18]对天卫五的观测进行了归算. 其中提出一种消除天王星对称光晕然后进行背景拟合的算法, 该方法提供了高精度的天测位置. 但本文使用的ISS图像并没有对称光晕. 2011年李真真等[19]在研究亮背景下形态学星点目标提取算法时, 运用数学形态学运算的特点得到估计的星图背景, 提出使用灰度形态学Top-Hat变换的方法消除背景, 对不均匀的杂光背景进行了有效的抑制. 2015年Popowicz等[20]提出可以通过消除较小的前景目标, 如恒星、宇宙射线或脉冲噪声等, 对缺失的像素进行插值, 来估计天文图像中具有强烈变化的背景, 如星系或星云. 上述各种方法显然仅适用于某些特定场合, 对于ISS图像中散射光背景的处理并不适用.

本文针对ISS图像中受土星光环的散射光影响的观测目标点源成像的天体测量技术进行了研究, 提出一种简单的散射光背景消除方法, 进而对70张相关图像进行了测量, 给出了一批近环内卫星的高精度天体测量位置. 第2节介绍了受散射光影响的观测目标的定心算法; 第3节介绍了ISS图像天体测量的主要步骤; 第4节介绍了一些近环小内卫星的天体测量结果; 第5节对测量结果和所提方法进行了对比分析; 第6节对工作进行了总结.

## 2 受散射光影响的近环内卫星的点源的定心

在近环内卫星的ISS图像中，卫星的点源成像会不同程度地受到土星光环散射光的影响, 只是有一些目标成像离土星光环很远, 这个影响完全可以忽略; 而另外有一些离环很近的卫星, 散射光将会严重干扰目标中心的测量, 甚至一般方法无法进行测量, 需要使用肉眼来挑选峰值像素作为其中心. 图1就展示了这种卫星离光环很近、受到影响的情况. 图中内卫星土卫三十二用黄色方框框出, 位置靠近土星光环, 右上角为土卫三十二及其周边的局部放大图. 从这个局部图里可以看到土卫三十二的图像明显受到光环散射光的影响. 在定心计算中, 如果不处理这种散射光背景, 将降低定心计算的精度, 严重的情况下, 常用的定心算法无法得到其中心位置.

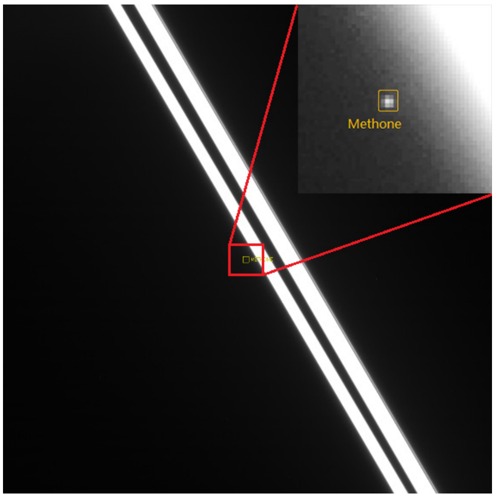


图 1 ISS图像中内卫星受土星光环杂散光影响的例子. 图中有一个土星内卫星土卫三十二, 它的成像受到土星光环的杂散光影响. 右上角为放大局部图.

Fig. 1 An example of inner satellite of Saturn affected by scattered light of Saturn rings in an ISS image. The image shows one inner satellite of Saturn, Methone, whose image is affected by the scattered light of Saturn rings. A magnified local image of Methone is shown in the upper right.

我们对这种受到土星光环散射光影响的内卫星的点源定心进行了研究, 提出了一种简单的方法. 该方法包括3个步骤: 确定背景和前景区域、背景拟合、目标天体定心.

第一步: 确定背景和前景区域. 在目标对象附近区域首先寻找峰值像素, 将峰值像素所在位置定为目标的初始中心. 观测目标的全景区域包括背景和前景, 假定目标的全景和前景是方形区域, 示意图如图2所示. 图中黑点为目标中心, 白色区域为目标的前景区域, 阴影部分为背景区域. $L_1$为前景区域边长, $L_2$为全景区域的边长. $L_1$和$L_2$可以按照具体情况进行设定. 实践中, 一般取$L_1$的最小值为3个像素, $L_2$的最小值为7个像素, 如果星象峰值灰度较大, 那么扩大其取值, 保证$L_2 \geqslant 2L_1 + 1$即可.

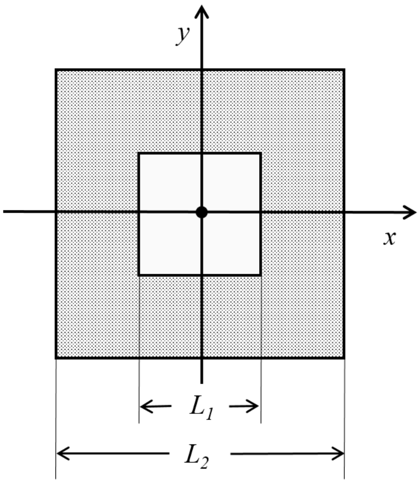


图 2 目标的前景与背景示意图. 目标中心为原点, 白色方框为前景, 阴影部分为背景.

Fig. 2 The diagram of foreground and background area of one target. The center of target is the origin. The white box is foreground and the shaded area is background.

第二步: 拟合背景. 在确定目标的前景和背景区域后, 首先根据背景区域, 对杂散光的背景进行模拟. 一个典型的杂散光背景如图3所示, 这是图1中土卫三十二的15×15邻域的三维立体图示, 其中高度为灰度值. 可以看出背景的灰度分布近似一个二维平面, 因此用一个二维平面来拟合背景区域的灰度分布, 背景灰度分布平面方程利用最小二乘法便可得, 如下所示:

$$z = ax + by + c\,, \tag{1}$$

其中$(x, y)$为背景区域内的像素点的坐标, 坐标系参考图2; $z$为该像素点的灰度值; $a$、$b$、$c$为拟合系数.

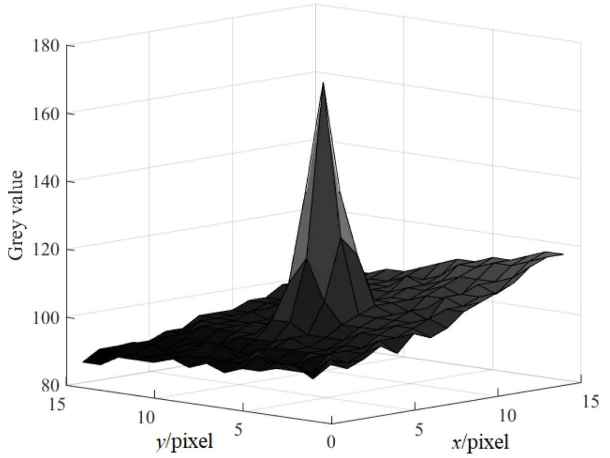


图 3 土卫三十二受土星环杂散光影响的三维图像

Fig. 3 The 3D image of Methone that is affected by scattered light of rings of Saturn

需要注意的是前面设定的背景区域是经验性的, 或由用户视觉决定, 并不代表完全准确的背景区域. 为了较为准确地拟合背景, 需要降低背景区域中的噪声或者区域内的非背景像素影响, 因此该背景拟合工作需要一点迭代细化, 具体过程如下.

首先假定背景区域内的所有像素的集合为$S_1$, 其内每个坐标为$(i, j)$的像素的灰度为$f_{ij}$. 求取所有的$f_{ij}$的均值$m$和标准差$\sigma$, 将所有灰度值不满足$m-2\sigma \leqslant f_{ij} \leqslant m+2\sigma$的像素点剔除(即$2\sigma$异常剔除), 得到新的背景像素的集合$S_2$.

然后使用最小二乘法对集合$S_2$和对应的$f_{ij}$进行平面拟合, 得到平面方程$p_1$. 根据$p_1$计算$S_2$内每个像素的背景灰度值$b_{ij}$, 进而得到每个像素点的灰度差异值$\Delta_{ij} = f_{ij} - b_{ij}$. 根据$\Delta_{ij}$对$S_2$进行$2\sigma$异常剔除, 得到新的背景像素集合$S_3$.

最后对集合$S_3$和其内每个像素点的灰度$f_{ij}$再次进行最小二乘的平面拟合. 通常来说, 经过两次细化, 可以得到较好的背景平面拟合结果.

第三步: 对目标进行定心. 在拟合得到背景平面后, 目标的全景区域内每个像素点的背景灰度值即可计算出来, 然后用初始灰度减去背景灰度, 即可达到消除背景中散射光的效果. 对于灰度更新后的星象, 采用Zhang等[7]提出的修正矩定心算法计算出目标的中心位置.

## 3 天体测量的步骤

使用ISS图像天体测量的专用软件包Caviar对近环小内卫星进行测量, 该软件包提供了整个ISS图像的天体测量流程, 但对目标受散射光影响的图像处理效果不佳, 将前述的消除散射光的定心算法嵌入Caviar中, 实现了该类图像的准确的天体测量. 整个定心测量包括如下几个步骤:

(1)相机指向的校正. 首先读入相关的Cassini轨迹和仪器文件(下载自: https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/pds/data/co-s_j_e_v-spice-6-v1.0/cosp_1000/data/), 提取相机的初始指向. 然后使用DAOPHOT (Dominion Astrophysical Observatory PHOTometry package)的Find算法[21]检测图像中的点源图像星, 根据相机的初始指向载入Gaia EDR3[22–23]星表中的星体, 对星体位置使用经典光行差公式进行光行差校正, 并归算其图像坐标位置. 基于自动[5]与人工检查相结合的方法对图像星和星表星进行匹配, 然后使用最小二乘法, 对相机指向进行校正;

(2)测量目标的中心. 使用前述消除散射光的定心算法对目标进行中心计算, 得到目标中心的图像位置, 然后对目标采用Owen的模型[1]进行几何扭曲校正, 再根据观测中Cassini、太阳和观测目标的相位关系进行相位校正[24], 最终得到目标的图像坐标;

(3)根据相机指向、目标的图像位置等, 使用逆向日心投影计算目标的赤经、赤纬, 最终得到目标的天体测量位置, 该位置是Cassini为站心的ICRS (International Celestial Reference System)坐标下的赤经、赤纬.

根据以上3个步骤, 可以得到每个ISS图像中近环内卫星的天体测量位置.

[1]Owen Jr, W., 2003. Cassini ISS Geometric Calibration of April 2003. JPL IOM 312.E-2003.

## 4　7颗近环内卫星的天体测量

在ISS拍摄的近环内卫星照片中收集了70张受散射光影响明显的图像(下载自PDS网站: http://pds-imaging.jpl.nasa.gov), 对它们进行了天体测量.

图4给出了近环内卫星的ISS图像的例子, 这些图像中测量对象在土星环附近, 成像都为点源状, 都受到环散射光的影响. 近环卫星暗弱, 图中近环卫星用黄色方框和黄色字体标注. 由于左图和中间图像中内卫星较为暗弱, 所以同时给出了内卫星附近的局部放大图. 所有图像大小为1024 × 1024像素. 这些图像拍摄于2004—2014年间, 其观测目标并不一定是内卫星, 不少是为了观测土星环. 这次测量涉及到了土卫十、土卫十一、土卫十五、土卫十六、土卫十七、土卫三十二和土卫四十九等7颗小内卫星, 表1给出了这些卫星和它们相关的观测数量.

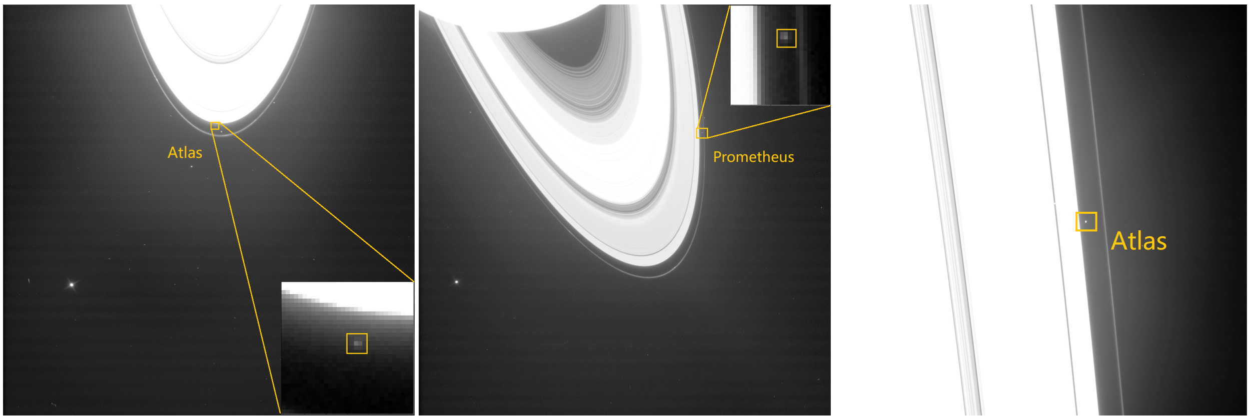


图 4　几幅受散射光影响的近环内卫星图像(对应的ISS图像集中的编号: N1464299584、N1464187684、N1783956625)

Fig. 4　Several images of near-ring inner satellites affected by scattered light (Corresponding image number in ISS image set: N1464299584, N1464187684, N1783956625)

**表 1　7颗土星近环内卫星和观测数量**

**Table 1　Seven near-ring inner satellites of Saturn and the numbers of their observations**

| Name | Numbers |
|---|---|
| Janus | 4 |
| Epimetheus | 5 |
| Atlas | 35 |
| Prometheus | 2 |
| Pandora | 5 |
| Methone | 12 |
| Anthe | 8 |

经过测量得到71个结果. 表2展示了全部结果. 该表中第1列是Cassini观测的图像编号, 第2列是图像拍摄的中间时刻, 第3列是测量的卫星的名称, 第4–5列是测量的卫星的赤经$\alpha$和赤纬$\delta$, 坐标是Cassini站心的ICRS坐标系. 为了数据使用方便, 表中同时给出了相机的指向和测量目标的图像位置, 也就是第6–10列. 其中第6–8列是Cassini的相机指向数据, 包括指向的赤经$\alpha_c$、赤纬$\delta_c$和扭转角Twist, 坐标系同上, 指向的详细信息见文献[11]. 第9–10列给出了目标在图像中的像素坐标, 图像坐标系中, 原点为图像的左上角, $x$正向朝右, $y$正向朝下. 考虑到数据使用者可能有更好的相位校正方法, 为了便于数据使用, 表格的第11–14列给出了相位校正前的赤经、赤纬以及图像中的像素坐标. 由于图像N1462095966包含了土卫十一和土卫十七两颗卫星, 因此全部的测量数据包括了71个天体测量位置.

表 2 所有测量结果

**Table 2 All measurement results**

| Image ID | Mid-time (UTC) | Body | $\alpha$/ degree | $\delta$/ degree | $\alpha_c$/ degree | $\delta_c$/ degree | Twist/ degree | Sample ($x$)/ pixel | Line ($y$)/ pixel | $\alpha^1$/ degree | $\delta^1$/ degree | Sample $(x)^1$/ pixel | Line $(y)^1$/ pixel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N1673817875 | 2011-015T20:37:09.551 | Anthe | 270.9543180 | 3.8857791 | 270.9543615 | 3.8858142 | 276.9078369 | 492.56 | 505.25 | 270.9543307 | 3.8857798 | 492.65 | 505.15 |
| N1673818235 | 2011-015T20:43:09.549 | Anthe | 271.0776861 | 3.8747661 | 271.0776781 | 3.8748049 | 276.8948447 | 412.71 | 387.90 | 271.0776988 | 3.8747668 | 412.83 | 387.95 |
| N1701606691 | 2011-337T11:41:09.810 | Anthe | 252.0044395 | 5.2911490 | 252.0044480 | 5.2911012 | 266.7094779 | 507.14 | 525.90 | 252.0044484 | 5.2911509 | 507.00 | 525.89 |
| N1710210865 | 2012-072T01:43:09.296 | Anthe | 229.7144528 | 6.1314371 | 229.7143269 | 6.1314105 | 268.7352376 | 515.28 | 535.81 | 229.7144577 | 6.1314396 | 515.19 | 536.19 |
| N1710534027 | 2012-075T19:29:09.249 | Anthe | 258.0979878 | 4.8199186 | 258.0980468 | 4.8200113 | 265.9914279 | 519.70 | 501.04 | 258.0979969 | 4.8199206 | 519.98 | 500.92 |
| N1710891880 | 2012-079T22:53:20.322 | Anthe | 270.3420919 | 3.8238043 | 270.3420981 | 3.8238030 | 265.0669631 | 498.36 | 497.63 | 270.3421019 | 3.8238061 | 498.35 | 497.64 |
| N1710892030 | 2012-079T22:55:49.981 | Anthe | 270.3897721 | 3.8195345 | 270.3898853 | 3.8195609 | 265.0585390 | 476.10 | 766.53 | 270.3897821 | 3.8195362 | 476.20 | 766.21 |
| N1711209032 | 2012-083T14:59:09.972 | Anthe | 279.6144641 | 2.8766005 | 279.6143587 | 2.8765685 | 264.5290038 | 526.40 | 522.84 | 279.6144805 | 2.8766029 | 526.26 | 523.18 |
| N1463988363[2] | 2004-144T07:02:09.920 | Atlas | 36.4263761 | 9.8913759 | 36.4263806 | 9.8913782 | 110.1761465 | 510.09 | 652.35 | 36.4263493 | 9.8913663 | 510.09 | 652.44 |
| N1463990463[2] | 2004-144T07:37:09.812 | Atlas | 36.4512926 | 9.8652600 | 36.4513419 | 9.8652703 | 110.1526299 | 256.56 | 733.88 | 36.4512658 | 9.8652504 | 256.64 | 734.06 |
| N1463990673[2] | 2004-144T07:40:39.810 | Atlas | 36.4550977 | 9.8626822 | 36.4551224 | 9.8627652 | 110.1527277 | 295.16 | 733.81 | 36.4550709 | 9.8626726 | 295.00 | 734.00 |
| N1464247445 | 2004-147T07:00:10.232 | Atlas | 36.4770689 | 9.9069225 | 36.4771076 | 9.9069304 | 110.1618909 | 566.81 | 656.56 | 36.4770400 | 9.9069121 | 566.83 | 656.76 |
| N1464247625 | 2004-147T07:03:10.231 | Atlas | 36.4774883 | 9.9044490 | 36.4774848 | 9.9044494 | 110.1841727 | 559.61 | 657.98 | 36.4774594 | 9.9044386 | 559.61 | 658.06 |
| N1464296671[2] | 2004-147T20:40:35.542 | Atlas | 36.5076575 | 9.9459498 | 36.5076602 | 9.9459034 | 89.8430204 | 642.46 | 246.26 | 36.5076262 | 9.9459386 | 642.56 | 246.38 |
| N1464296704 | 2004-147T20:41:08.541 | Atlas | 36.5071719 | 9.9454937 | 36.5071665 | 9.9454654 | 89.8332801 | 641.75 | 247.75 | 36.5071406 | 9.9454824 | 641.79 | 247.84 |
| N1464298144 | 2004-147T21:05:08.532 | Atlas | 36.4919172 | 9.9259089 | 36.4919177 | 9.9258833 | 89.8365300 | 584.60 | 293.27 | 36.4918858 | 9.9258976 | 584.64 | 293.37 |
| N1464299551 | 2004-147T21:28:35.523 | Atlas | 36.4891308 | 9.9062976 | 36.4891268 | 9.9062506 | 89.8537099 | 526.86 | 303.13 | 36.4890995 | 9.9062864 | 526.97 | 303.21 |
| N1464299584 | 2004-147T21:29:08.523 | Atlas | 36.4892030 | 9.9057997 | 36.4892061 | 9.9057889 | 89.8547233 | 526.31 | 302.88 | 36.4891717 | 9.9057885 | 526.31 | 302.98 |
| N1464300271 | 2004-147T21:40:35.518 | Atlas | 36.4923504 | 9.8962089 | 36.4923605 | 9.8961987 | 89.8488713 | 497.54 | 294.68 | 36.4923191 | 9.8961977 | 497.53 | 294.81 |
| N1464320790[2] | 2004-148T03:22:34.985 | Atlas | 37.2738029 | 9.8452509 | 37.2737782 | 9.8452792 | 89.6979761 | 357.08 | 879.07 | 37.2737719 | 9.8452397 | 357.00 | 879.00 |
| N1464322950[2] | 2004-148T03:58:34.370 | Atlas | 37.3192816 | 9.8726933 | 37.3192575 | 9.8726698 | 89.6813254 | 437.43 | 751.70 | 37.3192505 | 9.8726821 | 437.47 | 751.70 |
| N1464323670 | 2004-148T04:10:34.366 | Atlas | 37.3285242 | 9.8824497 | 37.3284836 | 9.8824631 | 89.6827479 | 466.40 | 726.29 | 37.3284930 | 9.8824385 | 466.33 | 726.24 |
| N1464325830 | 2004-148T04:46:34.352 | Atlas | 37.3373387 | 9.9128527 | 37.3373110 | 9.9128150 | 89.6772000 | 554.90 | 704.27 | 37.3373075 | 9.9128415 | 554.98 | 704.27 |
| N1464326550[2] | 2004-148T04:58:34.947 | Atlas | 37.3338774 | 9.9230512 | 37.3338753 | 9.9230020 | 89.6880155 | 584.60 | 715.14 | 37.3338461 | 9.9230399 | 584.70 | 715.21 |
| N1464326583 | 2004-148T04:59:07.347 | Atlas | 37.3336315 | 9.9235144 | 37.3336415 | 9.9234672 | 89.6911671 | 585.71 | 715.89 | 37.3336003 | 9.9235031 | 585.81 | 716.00 |
| N1464508221 | 2004-150T07:26:24.439 | Atlas | 36.5484625 | 9.8915875 | 36.5484866 | 9.8916282 | 110.1155458 | 378.22 | 591.21 | 36.5484313 | 9.8915762 | 378.14 | 591.41 |
| N1464870789 | 2004-154T12:09:10.172 | Atlas | 36.6705468 | 9.8930729 | 36.6706103 | 9.8930464 | 110.1304777 | 594.47 | 689.19 | 36.6705115 | 9.8930602 | 594.61 | 689.43 |
| N1465281131[2] | 2004-159T06:08:09.500 | Atlas | 36.9996196 | 9.9658820 | 36.9995818 | 9.9658640 | 110.0876683 | 740.00 | 249.58 | 36.9995780 | 9.9658671 | 740.00 | 249.60 |
| N1476333533 | 2004-287T04:13:39.373 | Atlas | 44.8178616 | 7.4203926 | 44.8178954 | 7.4204254 | 90.5935769 | 166.49 | 895.00 | 44.8177510 | 7.4203516 | 166.43 | 895.26 |
| N1476394809 | 2004-287T21:14:55.314 | Atlas | 45.0820933 | 7.6444962 | 45.0820782 | 7.6444716 | 90.6219045 | 496.94 | 643.43 | 45.0819769 | 7.6444531 | 496.89 | 643.72 |
| N1479142362 | 2004-319T16:27:10.043 | Atlas | 28.9133690 | 6.5834933 | 28.9133216 | 6.5835177 | 88.7736279 | 778.99 | 860.70 | 28.9132063 | 6.5834311 | 778.68 | 860.96 |
| N1479215892 | 2004-320T12:52:38.888 | Atlas | 26.5559008 | 6.5345085 | 26.5558129 | 6.5344970 | 88.4581173 | 549.75 | 51.69 | 26.5557359 | 6.5344449 | 549.58 | 52.01 |
| N1479216612 | 2004-320T13:04:38.883 | Atlas | 26.5364064 | 6.5009860 | 26.5363378 | 6.5009492 | 88.4910131 | 453.85 | 135.69 | 26.5362420 | 6.5009226 | 453.77 | 136.02 |
| N1479217332 | 2004-320T13:16:38.878 | Atlas | 26.5301985 | 6.4668069 | 26.5301401 | 6.4667845 | 88.4734396 | 361.97 | 182.40 | 26.5300345 | 6.4667436 | 361.87 | 182.76 |
| N1479218052 | 2004-320T13:28:38.873 | Atlas | 26.5372773 | 6.4322776 | 26.5372383 | 6.4322600 | 88.4927611 | 268.98 | 189.01 | 26.5371137 | 6.4322146 | 268.90 | 189.44 |
| N1479722160 | 2004-326T09:30:24.599 | Atlas | 35.8793581 | 5.8563812 | 35.8793407 | 5.8563934 | 89.5459533 | 306.42 | 275.48 | 35.8792128 | 5.8563263 | 306.26 | 275.89 |
| N1480004537 | 2004-329T15:56:39.756 | Atlas | 37.4928116 | 4.8574333 | 37.4927585 | 4.8574750 | 89.7162788 | 418.45 | 215.03 | 37.4926728 | 4.8573801 | 418.18 | 215.31 |
| N1480005287 | 2004-329T16:09:09.752 | Atlas | 37.5984698 | 4.8326142 | 37.5984818 | 4.8326366 | 89.7599096 | 322.76 | 329.77 | 37.5983315 | 4.8325611 | 322.56 | 330.22 |
| N1480264069 | 2004-332T16:02:10.063 | Atlas | 40.9504437 | 4.3786756 | 40.9503674 | 4.3787252 | 90.1441327 | 331.98 | 340.66 | 40.9503055 | 4.3786220 | 331.70 | 340.86 |
| N1485518723 | 2005-027T11:39:09.564 | Atlas | 35.0183244 | −2.0400213 | 35.0184421 | −2.0400649 | 111.9616998 | 429.95 | 508.49 | 35.0181351 | −2.0400969 | 430.20 | 509.35 |
| N1497236199 | 2005-163T02:29:10.358 | Atlas | 38.7799911 | −1.0999276 | 38.7799871 | −1.0999015 | 200.8815500 | 506.42 | 524.38 | 38.7796089 | −1.1000727 | 507.63 | 524.46 |
| N1783956625 | 2014-194T14:31:19.923 | Atlas | 220.8145993 | −3.1946665 | 220.8145917 | −3.1947127 | 90.0588415 | 622.84 | 540.72 | 220.8145881 | −3.1946502 | 623.03 | 540.73 |
| N1479460544 | 2004-323T08:50:10.307 | Atlas | 32.6321149 | 6.2742491 | 32.6321078 | 6.2742413 | 89.1860906 | 288.31 | 273.20 | 32.6319629 | 6.2741916 | 288.19 | 273.65 |

表 2 续
**Table 2 Continued**

| Image ID | Mid-time (UTC) | Body | $\alpha$/ degree | $\delta$/ degree | $\alpha_c$/ degree | $\delta_c$/ degree | Twist/ degree | Sample ($x$)/ pixel | Line ($y$)/ pixel | $\alpha^1$/ degree | $\delta^1$/ degree | Sample ($x$)[1]/ pixel | Line ($y$)[1]/ pixel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N1460857122 | 2004-108T01:15:09.559 | Epimetheus | 36.4395803 | 9.9294808 | 36.4395464 | 9.9294826 | 89.5990786 | 216.88 | 142.86 | 36.4395345 | 9.9294644 | 216.92 | 143.01 |
| N1461545747 | 2004-116T00:32:09.734 | Epimetheus | 36.1936720 | 9.8309378 | 36.1936907 | 9.8309211 | 89.6047039 | 231.28 | 564.88 | 36.1936211 | 9.8309194 | 231.32 | 565.07 |
| N1461546347 | 2004-116T00:42:09.730 | Epimetheus | 36.2057969 | 9.8280275 | 36.2058734 | 9.8279541 | 89.5815343 | 388.66 | 303.24 | 36.2057460 | 9.8280091 | 388.83 | 303.62 |
| N1462095966 | 2004-122T09:22:25.490 | Epimetheus | 36.5237643 | 9.8108446 | 36.5237398 | 9.8107973 | 89.5831079 | 525.51 | 489.84 | 36.5237087 | 9.8108245 | 525.59 | 489.93 |
| N1462322752 | 2004-125T00:22:09.673 | Epimetheus | 36.2088916 | 9.8475525 | 36.2088794 | 9.8475701 | 89.6008090 | 214.62 | 949.42 | 36.2088333 | 9.8475314 | 214.64 | 949.37 |
| N1459822551 | 2004-096T01:52:24.957 | Janus | 36.1065996 | 9.9196815 | 36.1065486 | 9.9196298 | 89.5713700 | 524.58 | 510.14 | 36.1065425 | 9.9196609 | 524.67 | 510.16 |
| N1459941607 | 2004-097T10:56:40.182 | Janus | 36.1292604 | 9.9237895 | 36.1292662 | 9.9237843 | 89.5717767 | 662.42 | 289.36 | 36.1292023 | 9.9237685 | 662.37 | 289.55 |
| N1460167193 | 2004-100T01:36:24.713 | Janus | 36.4267529 | 9.9081499 | 36.4268163 | 9.9081346 | 89.6165859 | 744.96 | 326.35 | 36.4266934 | 9.9081283 | 744.93 | 326.71 |
| N1460975548 | 2004-109T10:08:54.448 | Janus | 36.1034549 | 9.8522793 | 36.1034494 | 9.8523283 | 89.5862645 | 337.47 | 623.78 | 36.1033881 | 9.8522551 | 337.27 | 623.94 |
| N1489392355[2] | 2005-072T07:39:16.656 | Methone | 32.5879492 | −6.4251955 | 32.5878605 | −6.4252745 | 89.2042922 | 515.95 | 929.80 | 32.5877588 | −6.4252699 | 515.95 | 930.00 |
| N1511115172[2] | 2005-323T17:43:54.664 | Methone | 53.9502930 | −6.0802781 | 53.9503298 | −6.0802952 | 111.7188416 | 497.62 | 523.48 | 53.9501910 | −6.0803183 | 497.71 | 523.88 |
| N1563764353 | 2007-203T02:24:39.728 | Methone | 131.0871956 | 0.1359511 | 131.0871361 | 0.1359272 | 126.7820919 | 506.48 | 523.45 | 131.0871689 | 0.1359312 | 506.43 | 523.37 |
| N1588451222 | 2008-123T19:49:39.344 | Methone | 142.3280677 | 1.9880023 | 142.3280188 | 1.9880177 | 96.3716667 | 513.62 | 544.28 | 142.3280510 | 1.9879940 | 513.54 | 544.19 |
| N1649994650 | 2010-105T03:06:09.962 | Methone | 277.9513065 | 3.2197321 | 277.9513629 | 3.2197723 | 264.7969539 | 526.08 | 481.43 | 277.9514382 | 3.2197283 | 526.19 | 481.66 |
| N1658888483 | 2010-208T01:35:39.290 | Methone | 254.0298244 | 5.2939688 | 254.0298191 | 5.2939542 | 179.7456265 | 518.25 | 511.07 | 254.0300090 | 5.2939756 | 517.70 | 511.00 |
| N1684262441 | 2011-136T17:52:09.583 | Methone | 231.5573515 | 6.1613367 | 231.5572364 | 6.1613421 | 268.5319266 | 511.64 | 498.62 | 231.5573915 | 6.1613467 | 511.62 | 499.07 |
| N1690639341 | 2011-210T13:13:09.575 | Methone | 275.0839604 | 3.4462078 | 275.0839069 | 3.4461822 | 264.7934220 | 490.51 | 495.58 | 275.0841316 | 3.4462240 | 490.33 | 496.22 |
| N1696387278 | 2011-277T01:51:29.840 | Methone | 224.4565907 | 6.2974014 | 224.4566068 | 6.2974245 | 269.5143627 | 516.89 | 507.90 | 224.4566229 | 6.2974159 | 516.91 | 507.94 |
| N1696387818 | 2011-277T02:00:29.837 | Methone | 224.7146750 | 6.2947221 | 224.7147098 | 6.2947596 | 269.4692113 | 443.48 | 631.93 | 224.7147078 | 6.2947367 | 443.55 | 631.92 |
| N1710211345 | 2012-072T01:51:09.293 | Methone | 229.9184104 | 6.1292679 | 229.9183957 | 6.1292728 | 268.7073255 | 512.75 | 521.01 | 229.9184601 | 6.1292932 | 512.69 | 521.19 |
| N1710349406 | 2012-073T16:12:09.419 | Methone | 249.0530794 | 5.4221365 | 249.0530830 | 5.4221125 | 356.7893290 | 495.65 | 516.36 | 249.0531721 | 5.4221619 | 495.90 | 516.52 |
| N1462095966 | 2004-122T09:22:25.490 | Pandora | 36.5940392 | 9.8236254 | 36.5939856 | 9.8236405 | 89.5831079 | 564.42 | 288.47 | 36.5939967 | 9.8236101 | 564.33 | 288.45 |
| N1464324390 | 2004-148T04:22:34.361 | Pandora | 37.2512336 | 9.8298241 | 37.2513123 | 9.8298584 | 89.6880155 | 312.02 | 948.20 | 37.2511633 | 9.8297988 | 311.92 | 948.47 |
| N1464327270 | 2004-148T05:10:34.342 | Pandora | 37.3239813 | 9.8639041 | 37.3239736 | 9.8638936 | 89.6763303 | 412.60 | 743.23 | 37.3239109 | 9.8638788 | 412.57 | 743.38 |
| N1464327990 | 2004-148T05:22:34.338 | Pandora | 37.3355022 | 9.8733522 | 37.3354505 | 9.8733561 | 89.6567432 | 441.46 | 711.43 | 37.3354318 | 9.8733268 | 441.38 | 711.46 |
| N1464328023 | 2004-148T05:23:07.337 | Pandora | 37.3359270 | 9.8737952 | 37.3359082 | 9.8737964 | 89.6370859 | 442.50 | 710.03 | 37.3358566 | 9.8737699 | 442.42 | 710.16 |
| N1464187684 | 2004-146T14:24:09.621 | Prometheus | 36.5602837 | 9.9828663 | 36.5603156 | 9.9827828 | 110.2115516 | 703.29 | 319.47 | 36.5602092 | 9.9828395 | 703.54 | 319.70 |
| N1463929083 | 2004-143T14:34:10.306 | Prometheus | 36.4078123 | 9.9014470 | 36.4077795 | 9.9014258 | 110.1716434 | 593.69 | 657.41 | 36.4077432 | 9.9014221 | 593.72 | 657.50 |

[1] Data after phase calibration.

[2] Images that can only be measured with the scattered light removed from background using the removal algorithm.

## 5 讨论

为了对本次测量进行评估, 测量结果和喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的土星系统历表SAT415的计算结果进行了比较. 也就是首先将SAT415历表中目标的位置考虑光行差和光行时的影响换算到Cassini站心的ICRS坐标系, 然后将测量结果和这个计算结果进行比较. 即计算出所有测量在赤经、赤纬方向的残差值. 通过观测的像素比例尺, 还可以将这种残差转换成距离表达. 也可以得到图像坐标系下$x$和$y$方向的测量残差. 最终得到3种尺度下的残差, 如图5–7所示. 图5为测量残差在$x$和$y$方向的分布, 图6展现了测量在赤经、赤纬方向的残差分布, 图7则为赤经、赤纬方向的距离残差. 表3给出了测量残差的统计结果, 包括了相位校正前后的3种尺度下的残差.

可以看出, 相位校正后准确性和精度都有明显改善. 相位校正后图像测量的像素精度在$x$和$y$方向分别达到0.10和0.14像素, 距离上的测量精度在赤经、赤纬方向分别为10.99 km和11.36 km. 根据文献[6]可以知道, 这个距离测量精度比地面望远镜的观测至少高出一个数量级, 距离测量的高精度主要归功于空间近距离观测本身.

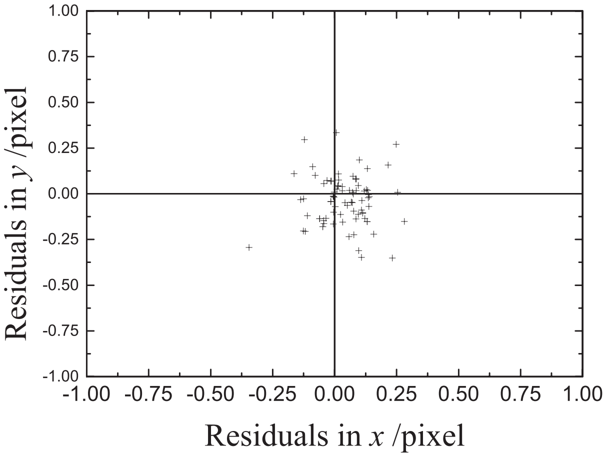


图 5　所有测量结果相对JPL历表SAT415在$x$和$y$方向的残差

Fig. 5　Residuals of all measurements relative to JPL SAT415 in $x$, $y$ directions

**表 3　相位校正前后所有测量结果相对JPL历表SAT415残差的均值和标准差**

**Table 3　The mean and standard deviation of residuals of all measurements before and after phase correction compared to JPL ephemeris SAT415**

| | BPC[1] | | APC[2] | |
|---|---|---|---|---|
| | Mean | Std | Mean | Std |
| $x$/pixel | 0.04 | 0.10 | 0.01 | 0.20 |
| $y$/pixel | −0.02 | 0.14 | 0.16 | 0.20 |
| $\alpha\cos\delta/''$ | 0.03 | 0.15 | 0.03 | 0.27 |
| $\delta/''$ | 0.01 | 0.13 | −0.06 | 0.16 |
| $\alpha\cos\delta$/km | 0.72 | 10.99 | 8.03 | 16.85 |
| $\delta$/km | 2.26 | 11.36 | −2.18 | 11.17 |

[1] BPC: Before Phase Correction.

[2] APC: After Phase Correction.

对于受散射光影响的目标测量, 需要消除散射光背景, 文中提出的方法解决了这一问题. 事实上在不进行散射光消除处理的情况下, 这70张图像中, 有10张无法得到测量结果. 对于剩余的60张图像, 使用不消除散射光背景的方法进行了目标位置的测量, 并和JPL历表SAT415进行了比较, 得到了残差. 最终对消除和不消除散射光的两种方法的残差进行了统计, 表4给出了相关的统计数据. 从该表可以看出, 消除散射光的方法相较于不消除, 它的残差在均值和标准差上都有改善. 标准差在$x$和$y$方向分别从0.20像素和0.20像素改善到0.09像素和0.14像素.

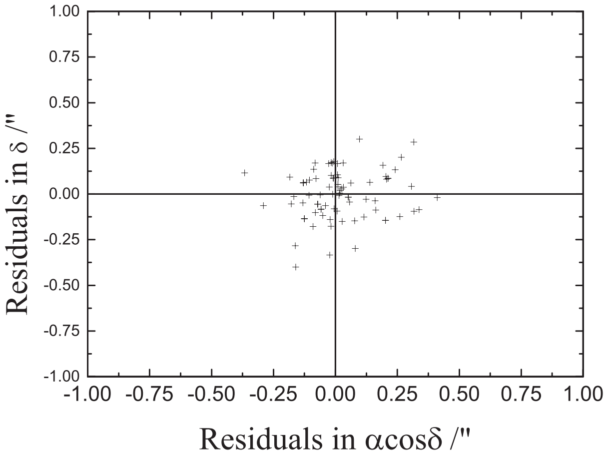


图 6　所有测量结果相对JPL历表SAT415在$\alpha\cos\delta$和$\delta$方向的残差(以角秒计)

Fig. 6　Residuals of all measurements relative to JPL SAT415 in $\alpha\cos\delta$ and $\delta$ directions (in arcsecond)

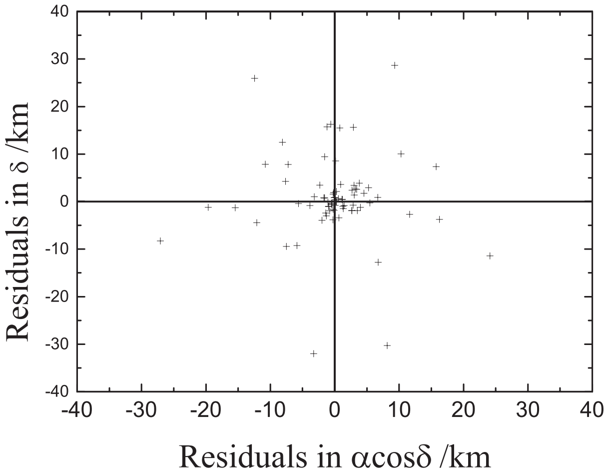


图 7　所有测量结果相对JPL历表SAT415在$\alpha\cos\delta$和$\delta$方向的残差(以千米计)

Fig. 7　Residuals of all measurements relative to JPL SAT415 in $\alpha\cos\delta$ and $\delta$ directions (in km)

如前所述, 消除散射光背景后, 原来不可测的10张图像变成了可以测量的图像, 而且用两者都可

以测量的图像进行比较, 表明文中方法对测量结果有明显改善.

表 4 文中所提方法与不消除散射光方法的结果对比
**Table 4 Comparison between the proposed scattered light correction method and the non-correction method**

| | Correction | | Non-correction | |
|---|---|---|---|---|
| | Mean | Std | Mean | Std |
| $x$/pixel | 0.04 | 0.09 | 0.05 | 0.20 |
| $y$/pixel | −0.02 | 0.14 | −0.09 | 0.20 |
| $\alpha\cos\delta$/km | 0.76 | 11.51 | −1.59 | 16.09 |
| $\delta$/km | 2.59 | 11.09 | 2.65 | 20.00 |

和前人的工作相比, 文中的测量有一些数据重复, 其中与文献[12]有41张图像重复, 与文献[14]有28张图像重复, 由于两篇文献之间数据也有重复, 最终发现重复测量的图像有48张. 将这48张图像在文献中的测量数据汇聚在了一起, 对于有重复测量者, 只保留最优结果(也就是最接近历表计算数值的测量数据). 使用这些数据, 计算了前人测量结果和文中测量结果相对历表SAT415的残差. 残差的统计情况见表5.

从表5可以看出, 本文的测量结果在$x$和$y$方向残差的标准差分别为0.11像素和0.16像素, 而前人的测量结果分别为0.18像素和0.56像素, 精度分别提高64%和250%. 这个提高是非常显著的. 这主要是因为一方面文献[12]和[14]没有进行背景消除, 另一方面他们使用了高斯法对目标进行定心. 从这些数据可以看出, 使用修正矩加背景消除的方法, 对受散射光影响的点源图像的测量可以带来大幅度的精度提升. 最后, 为了便于参考, 重复测量的48张图像的结果放在了表6中, 包括前人测量结果和文中对应的测量结果, 同时也给出了历表计算位置. 需要指出的是, 文献[12]采用的坐标系和文中的稍有差异, 因此表6给出的文献[12]的数据是做了简单的坐标变换的结果, 以便于所有的数据都在同一个坐标系.

表 5 前人的测量与文中对应测量的结果对比
**Table 5 The comparison between our results and the previous research results**

| | $x$/pixel | | $y$/pixel | |
|---|---|---|---|---|
| | Mean | Std | Mean | Std |
| Previous results | −0.04 | 0.18 | −0.31 | 0.56 |
| Our results | −0.03 | 0.11 | 0.01 | 0.16 |

表 6 前人的测量与文中对应的测量结果
**Table 6 The previous research results and ours**

| No. | Image ID | Mid-time (UTC) | Body | Previous research results[1] | | Our results | | Computed position[2] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $x$/pixel | $y$/pixel | $x$/pixel | $y$/pixel | $x$/pixel | $y$/pixel |
| 1 | N1465281131 | 2004-159T06:08:09.500 | Atlas | 739.23 | 248.70 | 740.00 | 249.58 | 740.00 | 249.48 |
| 2 | N1464870789 | 2004-154T12:09:10.172 | Atlas | 594.46 | 688.60 | 594.47 | 689.19 | 594.61 | 689.32 |
| 3 | N1464326583 | 2004-148T04:59:07.347 | Atlas | 585.75 | 715.15 | 585.71 | 715.89 | 585.84 | 715.91 |
| 4 | N1464326550 | 2004-148T04:58:34.947 | Atlas | 584.68 | 714.44 | 584.60 | 715.14 | 584.84 | 715.91 |
| 5 | N1464325830 | 2004-148T04:46:34.352 | Atlas | 555.03 | 703.23 | 554.90 | 704.27 | 555.01 | 704.18 |
| 6 | N1464323670 | 2004-148T04:10:34.366 | Atlas | 466.38 | 725.30 | 466.40 | 726.29 | 466.37 | 726.15 |
| 7 | N1464322950 | 2004-148T03:58:34.370 | Atlas | 437.55 | 750.58 | 437.43 | 751.70 | 437.50 | 751.61 |
| 8 | N1464320790 | 2004-148T03:22:34.985 | Atlas | 356.84 | 878.05 | 357.08 | 879.07 | 357.03 | 878.91 |
| 9 | N1464300271 | 2004-147T21:40:35.518 | Atlas | 497.58 | 293.82 | 497.54 | 294.68 | 497.57 | 294.72 |

表 6 续

**Table 6 Continued**

| No. | Image ID | Mid-time (UTC) | Body | Previous research results[1] $x$/pixel | Previous research results[1] $y$/pixel | Our results $x$/pixel | Our results $y$/pixel | Computed position[2] $x$/pixel | Computed position[2] $y$/pixel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | N1464299584 | 2004-147T21:29:08.523 | Atlas | 526.17 | 301.80 | 526.31 | 302.88 | 526.34 | 302.89 |
| 11 | N1464299551 | 2004-147T21:28:35.523 | Atlas | 527.02 | 302.14 | 526.86 | 303.13 | 527.00 | 303.12 |
| 12 | N1464298144 | 2004-147T21:05:08.532 | Atlas | 584.78 | 292.34 | 584.60 | 293.27 | 584.67 | 293.28 |
| 13 | N1464296704 | 2004-147T20:41:08.541 | Atlas | 641.93 | 246.92 | 641.75 | 247.75 | 641.82 | 247.75 |
| 14 | N1464296671 | 2004-147T20:40:35.542 | Atlas | 642.29 | 245.49 | 642.46 | 246.26 | 642.59 | 246.29 |
| 15 | N1489392355 | 2005-072T07:39:16.656 | Methone | 516.00 | 929.01 | 515.95 | 929.80 | 516.18 | 929.45 |
| 16 | N1464328023 | 2004-148T05:23:07.337 | Pandora | 442.49 | 708.96 | 442.50 | 710.03 | 442.50 | 709.96 |
| 17 | N1464327990 | 2004-148T05:22:34.338 | Pandora | 441.34 | 710.31 | 441.46 | 711.43 | 441.46 | 711.26 |
| 18 | N1464327270 | 2004-148T05:10:34.342 | Pandora | 412.56 | 742.23 | 412.60 | 743.23 | 412.65 | 743.18 |
| 19 | N1464324390 | 2004-148T04:22:34.361 | Pandora | 311.92 | 947.16 | 312.02 | 948.20 | 311.99 | 948.27 |
| 20 | N1463929083 | 2004-143T14:34:10.306 | Prometheus | 593.70 | 657.02 | 593.69 | 657.41 | 593.72 | 657.29 |
| 21 | N1463990673 | 2004-144T07:40:39.810 | Atlas | 734.00 | 295.00 | 733.81 | 295.16 | 733.92 | 295.00 |
| 22 | N1463990463 | 2004-144T07:37:09.812 | Atlas | 734.00 | 257.00 | 733.88 | 256.56 | 733.98 | 256.64 |
| 23 | N1480264069 | 2004-332T16:02:10.063 | Atlas | 332.03 | 340.88 | 331.98 | 340.66 | 331.85 | 340.46 |
| 24 | N1480005287 | 2004-329T16:09:09.752 | Atlas | 322.92 | 329.84 | 322.76 | 329.77 | 322.71 | 329.82 |
| 25 | N1480004537 | 2004-329T15:56:39.756 | Atlas | 418.16 | 214.94 | 418.45 | 215.03 | 418.34 | 214.91 |
| 26 | N1479722160 | 2004-326T09:30:24.599 | Atlas | 306.10 | 275.92 | 306.42 | 275.48 | 306.42 | 275.47 |
| 27 | N1479460544 | 2004-323T08:50:10.307 | Atlas | 288.08 | 273.71 | 288.31 | 273.20 | 288.37 | 273.22 |
| 28 | N1479218052 | 2004-320T13:28:38.873 | Atlas | 269.11 | 188.58 | 268.98 | 189.01 | 269.09 | 188.97 |
| 29 | N1479217332 | 2004-320T13:16:38.878 | Atlas | 362.08 | 182.32 | 361.97 | 182.40 | 362.07 | 182.29 |
| 30 | N1479216612 | 2004-320T13:04:38.883 | Atlas | 454.05 | 135.48 | 453.85 | 135.69 | 453.97 | 135.55 |
| 31 | N1479215892 | 2004-320T12:52:38.888 | Atlas | 549.90 | 51.55 | 549.75 | 51.69 | 549.78 | 51.54 |
| 32 | N1479142362 | 2004-319T16:27:10.043 | Atlas | 778.99 | 860.98 | 778.99 | 860.70 | 778.87 | 860.49 |
| 33 | N1476394809 | 2004-287T21:14:55.314 | Atlas | 496.86 | 643.88 | 496.94 | 643.43 | 497.01 | 643.38 |
| 34 | N1476333533 | 2004-287T04:13:39.373 | Atlas | 166.28 | 895.18 | 166.49 | 895.00 | 166.54 | 894.94 |
| 35 | N1464508221 | 2004-150T07:26:24.439 | Atlas | 378.06 | 590.70 | 378.22 | 591.21 | 378.14 | 591.31 |
| 36 | N1464247625 | 2004-147T07:03:10.231 | Atlas | 559.75 | 657.55 | 559.61 | 657.98 | 559.61 | 657.97 |
| 37 | N1464247445 | 2004-147T07:00:10.232 | Atlas | 566.85 | 656.34 | 566.81 | 656.56 | 566.83 | 656.67 |
| 38 | N1462322752 | 2004-125T00:22:09.673 | Epimetheus | 949.28 | 214.76 | 949.42 | 214.62 | 949.20 | 214.70 |
| 39 | N1462095966 | 2004-122T09:22:25.490 | Epimetheus | 489.96 | 525.88 | 489.84 | 525.51 | 489.77 | 525.65 |

表 6 续

**Table 6 Continued**

| No. | Image ID | Mid-time (UTC) | Body | Previous research results[1] | | Our results | | Computed position[2] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $x$/pixel | $y$/pixel | $x$/pixel | $y$/pixel | $x$/pixel | $y$/pixel |
| 40 | N1460857122 | 2004-108T01:15:09.559 | Epimetheus | 143.01 | 216.92 | 143.01 | 216.88 | 142.88 | 216.97 |
| 41 | N1461546347 | 2004-116T00:42:09.730 | Epimetheus | 388.92 | 303.73 | 388.66 | 303.24 | 388.88 | 303.48 |
| 42 | N1461545747 | 2004-116T00:32:09.734 | Epimetheus | 231.23 | 565.03 | 231.28 | 564.88 | 231.38 | 564.93 |
| 43 | N1460975548 | 2004-109T10:08:54.448 | Janus | 623.96 | 337.20 | 623.96 | 337.47 | 623.75 | 337.34 |
| 44 | N1460167193 | 2004-100T01:36:24.713 | Janus | 744.94 | 326.78 | 744.96 | 326.35 | 745.00 | 326.54 |
| 45 | N1459941607 | 2004-097T10:56:40.182 | Janus | 662.16 | 289.72 | 662.42 | 289.36 | 662.43 | 289.39 |
| 46 | N1459822551 | 2004-096T01:52:24.957 | Janus | 524.72 | 510.09 | 524.58 | 510.14 | 524.74 | 509.99 |
| 47 | N1462095966 | 2004-122T09:22:25.490 | Pandora | 288.31 | 564.52 | 288.47 | 564.42 | 288.33 | 564.37 |
| 48 | N1464187684 | 2004-146T14:24:09.621 | Prometheus | 703.70 | 319.81 | 703.29 | 319.47 | 703.54 | 319.47 |

[1] Previous research results: the first twenty results are from Ref. [12], others are from Ref. [14].

[2] Computed position: from the JPL ephemeris SAT415.

## 6 结论

在对ISS图像进行天体测量的过程中, 在点源状目标的背景受土星光环散射光影响的情况下, 直接使用修正矩或高斯定心算法, 将导致测量精度降低甚至无法测量的情况. 针对这一情况, 提出了一种背景消除的定心算法, 使用平面拟合散射光背景, 然后使用修正矩方法计算背景消除后的目标中心. 该方法能够正常测量直接使用高斯法或者修正矩方法无法测量的图像, 对原先可以正常测量的图像能够进一步改善其测量精度. 利用所提出的方法, 测量了70张ISS图像, 获得了土卫十、土卫十一、土卫十五、土卫十六、土卫十七、土卫三十二和土卫四十九等7颗小内卫星的71个天体测量位置. 测量结果和JPL历表SAT415相比, 在图像坐标的$x$和$y$方向, 残差的均值分别为0.04和$-0.02$像素, 标准差分别为0.10和0.14像素. 在Cassini站心的ICRS坐标中, 赤经、赤纬方面的残差的标准差分别为10.99 km和11.36 km. 这个结果和不消除散射光背景的算法相比, 精度提高超过43%, 和前人的测量数据相比, 精度提升更为明显.

这些测量一方面证明了本文所提的测量方法对受散射光影响的内卫星的ISS图像的天体测量是有效的, 另外一方面也为相关目标的动力学研究提供了高精度数据补充. 这个方法也可以应用到ISS图像中其他目标的测量上. 需要指出的是, 文中所提方法存在一定的局限性, 当卫星的位置距离土星环非常近时, 背景受散射光的影响极为强烈. 这个时候无法找出合适的目标背景区域, 并且背景灰度分布也不符合平面分布的规律, 此时使用本文所提方法也无法进行测量. 在后续研究中, 将继续对这些情况进行研究, 以便获取更多珍贵的高精度土星卫星天体测量数据.

**致谢** 感谢匿名审稿人, 其评审意见明显提高了论文的质量.

## 参考文献

[1] Cooper N J, Murray C D, Evans M W, et al. Icarus, 2008, 195: 765

[2] Cooper N J, Murray C D, Lainey V, et al. A&A, 2014, 572: A43

[3] Tajeddine R, Cooper N J, Lainey V, et al. A&A, 2013, 551: A129

[4] Tajeddine R, Lainey V, Cooper N J, et al. A&A, 2015, 575: A73

[5] 张庆丰, 熊语桃, 彭青玉,等. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2019, 49: 8

[6] Zhang Q F, Lainey V, Cooper N J, et al. MNRAS, 2018, 481: 98

[7] Zhang Q F, Zhou X M, Tan Y, et al. MNRAS, 2021, 505: 5253
[8] Zhang Q F, Qin W H, Ma Y L, et al. P&SS, 2022, 221: 105553
[9] Lainey V, Casajus L G, Fuller J, et al. NatAs, 2020, 4: 1053
[10] Poulet F, Sicardy B. A&A, 2001, 366: 339
[11] Porco C C, Baker E, Barbara J, et al. Science, 2005, 307: 1226
[12] Spitale J N, Jacobson R A, Porco C C, et al. AJ, 2006, 132: 692
[13] Jacobson R A, Spitale J, Porco C C, et al. AJ, 2008, 135: 261
[14] Cooper N J , Renner S, Murray C D, et al. AJ, 2014, 149: 27
[15] Cooper N J, Lainey V, Meunier L E, et al. A&A, 2018, 610: A2
[16] Lainey V, Noyelles B, Cooper N, et al. Icarus, 2019, 326: 48
[17] Shen T S, Zhang C H, Wang X W. Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Wash: SPIE, 2007, 6795: 1200
[18] 谢华娇, 彭青玉, 王娜, 等. 天文学报, 2018, 59: 10
[19] 李真真, 魏宏刚. 光电工程, 2011, 38: 23
[20] Popowicz A, Smolka B. MNRAS, 2015, 452: 809
[21] Stetson, P. B. PASP, 1987, 99: 191
[22] Prusti T, de Bruijne J H J, Brown A G A, et al. A&A, 2016, 595: A1
[23] Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. A&A, 2021, 649: A1
[24] Lindegren L. A&A, 1977, 57: 55

# Astrometry of Cassini ISS Images of 7 Near-ring Inner Satellites of Saturn Affected by Scattered Light

WANG Zhi-qiang[1] LIU Meng-qi[1] ZHANG Qing-feng[1,2] WU Lin-peng[1] OU Zhao-jie[1] LI Yan[1,2] LI Zhan[1,2]

*(1 Department of Computer Science, College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632)*
*(2 Sino-French Joint Laboratory for Astrometry, Dynamics and Space Science, Jinan University, Guangzhou 510632)*

**Abstract** The Imaging Science Subsystem (ISS) mounted on Cassini spacecraft took images of Saturn's inner satellites between 2004 and 2017. In some of these images, the satellites are so close to Saturn rings that their images are affected by the scattered light from Saturn rings, which results in poor, even impossible, measurements of targets. A background removal algorithm is proposed to measure such images. A total of 70 ISS images of seven inner satellites near Saturn rings (Janus, Epimetheus, Atlas, Prometheus, Pandora, Methone, Anthe) have been reduced by using the proposed method. Compared with the results from the method without removing the background affected by scattered light, the proposed method demonstrates an improvement in accuracy of at least 43%. The final results show that the residuals of these measurements relative to the JPL ephemeris SAT415 have means of about 0.72 km and 2.26 km in right ascension ($\alpha$) and declination ($\delta$), with standard deviations of 10.99 km and 11.36 km, respectively.

**Key words** astrometry, techniques: image processing, methods: data analysis, planets and satellites: individual: Janus, Epimetheus, Atlas, Prometheus, Pandora, Methone, Anthe